

Etude de l'impact des drones taxis sur l'occupation du sol à travers un réseau routier, exemple appliqué au cas de Paris

Florian Gruchala POLYTECH Tours, étudiant en 5^{ème} année

Mindjid Maïzia Tuteur du projet, enseignant chercheur à POLYTECH Tours, responsable de la filière STI à l'université technologique de Compiègne

Avertissements

Cette recherche a fait appel à des lectures, enquêtes et interviews. Tout emprunt à des contenus d'interviews, des écrits autres que strictement personnel, toute reproduction et citation, font systématiquement l'objet d'un référencement. L'auteur (les auteurs) de cette recherche a (ont) signé une attestation sur l'honneur de non-plagiat.

Formation par la recherche, Projet de Fin d'Etudes en génie de l'aménagement et de l'environnement

La formation au génie de l'aménagement et de l'environnement, assurée par le département aménagement et environnement de l'Ecole Polytechnique de l'Université de Tours, associe dans le champ de l'urbanisme, de l'aménagement des espaces fortement à faiblement anthropisés, l'acquisition de connaissances fondamentales, l'acquisition de techniques et de savoir-faire, la formation à la pratique professionnelle et la formation par la recherche. Cette dernière ne vise pas à former les seuls futurs élèves désireux de prolonger leur formation par les études doctorales, mais tout en ouvrant à cette voie, elle vise tout d'abord à favoriser la capacité des futurs ingénieurs à :

- Accroître leurs compétences en matière de pratique professionnelle par la mobilisation de connaissances et de techniques, dont les fondements et contenus ont été explorés le plus finement possible afin d'en assurer une bonne maîtrise intellectuelle et pratique,
- Accroître la capacité des ingénieurs en génie de l'aménagement et de l'environnement à innover tant en matière de méthodes que d'outils, mobilisables pour affronter et résoudre les problèmes complexes posés par l'organisation et la gestion des espaces.

La formation par la recherche inclut un exercice individuel de recherche, le projet de fin d'études (P.F.E.), situé en dernière année de formation des élèves ingénieurs. Cet exercice correspond à un stage d'une durée minimum de trois mois, en laboratoire de recherche, principalement au sein de l'équipe Dynamiques et Actions Territoriales et Environnementales de l'UMR 7324 CITERES à laquelle appartiennent les enseignants-chercheurs du département aménagement.

Le travail de recherche, dont l'objectif de base est d'acquérir une compétence méthodologique en matière de recherche, doit répondre à l'un des deux grands objectifs :

- Développer toute ou partie d'une méthode ou d'un outil nouveau permettant le traitement innovant d'un problème d'aménagement
- Approfondir les connaissances de base pour mieux affronter une question complexe en matière d'aménagement.

Afin de valoriser ce travail de recherche nous avons décidé de mettre en ligne sur la base du Système Universitaire de Documentation (SUDOC), les mémoires à partir de la mention bien

article info

Historique de l'article :

Reçu 13 Décembre 2019

Mots clés :

Drone Taxi

Occupation du sol

Temps de parcours

Autonome

Milieu urbain

résumé

Le marché du transport de biens et de personnes par drones automatisés est en plein essor. En effet, le transport de marchandise pour la livraison de biens est à l'étude dans des entreprises comme Amazon et le transport de personnes est en phase d'expérimentation chez plusieurs constructeurs comme EHang ou Volocopter en collaboration avec différents clients comme les pouvoirs publics de Dubaï, Emirats arabes unis ou ceux de Vienne, Autriche. Bien que son utilisation ne soit pas encore effective du fait du manque de législation, bon nombre de pays et particulièrement de métropoles se montrent intéressés par ce nouveau mode de transport. En effet, ce mode de transport serait sollicité en milieu urbain dense, voire très dense afin de désengorger les réseaux de transport existants déjà largement sollicités. La création d'un nouveau réseau de transport dans un espace encore très peu utilisé au sein d'un milieu urbain amène de nombreuses problématiques tant en matière de respect de la vie privée que de sécurité. La législation en vigueur dans les pays européens n'encadre pas suffisamment son exploitation, mais elle peut être apparentée dans un premier temps à la législation concernant les drones dits « classiques » (drones utilisés pour filmer ou réaliser des photographies). Le degré de contrainte exercé sur ce nouveau mode de transport n'est donc pas encore clairement défini et ses capacités à répondre aux attentes des usagers ne sont pas déterminées. En particulier, l'impact de l'occupation du sol sur le drone taxi n'est pas clairement pris en compte. Cet impact se traduira principalement par des zones d'exclusions de survol. En somme, cet impact sera porté sur le réseau de transport du drone taxi qui oscillera entre un réseau complet et un réseau arbre (sous forme de couloirs aériens pour ce dernier).

1. Introduction

1.1. Contexte des Drones Taxis

Dans une optique d'urbanisation et de métropolisation toujours plus forte dans des pôles urbains denses, les réseaux de transports actuels arrivent à la limite de leurs capacités, demandant des investissements de plus en plus conséquents pour des améliorations de moins en moins importantes. L'exploitation d'un nouveau réseau de transport jusque-là très peu sollicité représente donc un enjeu important pour la mobilité dans ces zones densément urbanisées. Un second enjeu est représenté par la pollution en milieu urbain. En effet, la pollution atmosphérique générée par les VP (Véhicules Particuliers) est une problématique rencontrée par l'ensemble des grandes métropoles, quel que soit le pays. L'utilisation de véhicules électriques comme les drones, apporterait en partie un élément de réponse face à des populations de plus en plus en proie à ce type de nuisance.

L'utilisation de ces drones taxis est en théorie plus aisée dans les grandes métropoles d'Amérique, du Moyen-Orient et d'Asie du fait de leurs formes urbaines. Il est vrai, la présence de gratte-ciels et de grandes avenues facilite l'implantation d'« aéroport » pour drone, aussi bien au sol que sur les sommets de ces buildings. Le cas des villes européennes est plus compliqué car leurs configurations résultent d'un passé historique et les contraintes de protection du paysage y sont fortes. Leurs configurations sont donc denses et peu élevées et ne permettent pas une distance significative avec le bâti environnant pour le passage du drone taxi. Ce manque de distance apporte un certain nombre de problématiques comme les vis-à-vis avec l'intérieur des bâtis, survolés ou à proximité immédiate avec les aéroports.

L'émergence du drone taxi à l'horizon 2030 va s'effectuer dans ce contexte. Les premiers vols commerciaux ne sont pas à prévoir avant les JO de 2024 pour le service de mobilité aérienne urbaine de la RATP en collaboration avec Airbus à Paris, France. Pour le cas de Los Angeles, USA UberAir espère un passage à la phase commerciale de son service de mobilité aérienne pour les JO 2028 à Los Angeles. Le cabinet de conseil en stratégie Oliver Wyman avance l'hypothèse que ces services de mobilité aérienne seront opérationnels en 2035 dans une

soixantaine de villes. Futuratech, mise sur une banalisation de ce type de transport pour 2040-2050 (Decourt, 27/05/2018).

1.2. Examen des possibilités d'analyse du réseau de transport

En milieu urbain pour une ville européenne, les possibilités d'utilisation du drone taxi sont à étudier. En effet, comme le drone taxi doit intervenir dans un espace où se concentrent des activités humaines, son utilisation augmente la vulnérabilité des biens et personnes qui se trouvent dans son champ d'utilisation. La vulnérabilité du milieu urbain exploité augmente avec l'arrivée de ce nouveau mode de transport, et ce de manière importante puisqu'il s'associe à la création d'un tout nouveau réseau de transport, qui lui aussi apporte une augmentation de cette vulnérabilité. Il paraît donc essentiel de prévenir et diminuer le plus possible cette vulnérabilité par le biais d'études de risques comme le suggère Yves Morier, conseiller du Directeur des certifications de l'EASA, et ainsi obtenir une autorisation d'exploitation (Hassani, 26/04/18).

Il est également intéressant de voir comment est analysé l'accessibilité pour d'autres modes de transports. Dans le monde anglo-saxon, la Public Transport Accessibility Level method (PTAL) est utilisée pour effectuer des planifications de transport au Royaume-Uni (méthode qui identifie l'accessibilité en 6 classes). Elle s'appuie notamment sur le niveau de service en heures de pointes (car bon indicateur des flux domicile-travail). Cette méthode est avant tout une aide à la décision pour la planification de projet de transport et d'urbanisme (Cyprien Richer, 2011).

Il est donc intéressant de regarder l'impact de l'occupation du sol sur notre réseau de drone taxi au regard de critères déjà utilisés pour d'autres analyse de projet d'infrastructure de transport. L'accessibilité semble donc être un indicateur adéquat pour évaluer notre réseau. Nous ne ferons toutefois pas varier notre réseau selon une composante dynamique de temps mais en modifiant la topologie du réseau.

1.3. But de ce projet

L'absence actuelle de législation, encadrant l'utilisation des drones, pour le transport de personnes en milieu urbain, permet de réfléchir à l'ensemble des configurations possibles du drone taxi en milieu urbain. En d'autres termes, on veut démontrer les possibilités d'exploitation du drone taxi, à partir de sa configuration sans aucune contrainte réglementaire, jusqu'à à une configuration contraignante, sans dépasser un certain seuil de performance, qui ne doit pas être inférieur à celui du taxi usuel (taxi par véhicule terrestre). On cherche à

démontrer jusqu'où on peut appliquer des contraintes sur un réseau (réseau des drones) pour le rendre toujours plus performant face au taxi terrestre.

2.2. Application au cas de Paris

Par soucis de capacité de calcul, le réseau routier de Paris a été simplifié à 6 sommets. Ces 6 sommets représentent les 6 stations de métropolitain/RER les plus fréquentées de la ville de Paris (Les Halles-Châtelet, Gare Montparnasse, Gare du Nord-Gare de l'Est, Gare de Lyon, Gare Saint-Lazare et Arc de Triomphe). Ces sommets resteront les mêmes dans l'étude de chacun des 2 réseaux.

Pour la suite des calculs, nous utiliserons les hypothèses suivantes. La fréquentation de chaque sommet, provenant du nombre d'utilisateurs du métropolitain/RER (discretisé), reflète la même réalité que la potentielle fréquentation de ces nœuds par les usagers du drone taxi. Encore, la vitesse du drone taxi est constante et est égale à 60 km/h. Il en va de même pour la vitesse du VP (Véhicule Particulier) qui aura une vitesse de 14,1 km/h (vitesse moyenne d'une voiture à Paris).

3. Cas d'étude : la ville de Paris

La ville de Paris (Paris intramuros) a été choisie comme cas d'étude pour ce modèle. En effet, cette ville regroupe les différentes problématiques soulevées par l'utilisation du drone taxi dans un milieu urbain : manque d'encadrement lié à l'exploitation du drone, problèmes relatifs à la sécurité liés au survol de biens, de personnes et de bâtiments sensibles comme les ICPE (Installations Classées pour la Protection de l'Environnement). Encore, cette ville est une ville soumise à de fortes réglementations en termes de protection du paysage et il en résulte un bâti peu élevé sur une majeure partie du territoire. Cette caractéristique différencie Paris des autres villes qui ont se sont montrées très intéressées par ce nouveau mode de transport (comme Dubaï ou Chicago). Ces villes possèdent une hauteur de bâti élevée et cette caractéristique facilite l'implantation des aéroports pour drone et diminue le temps pour rejoindre la hauteur de vol prescrite. Le cas de Paris est donc un cas défavorable sur ce critère.

Montrer que l'exploitation du drone taxi est possible et ce, sur plusieurs configurations de réseau, est donc d'autant plus intéressant et plus vrai si l'on choisit d'utiliser un cas défavorable.

La ville de Paris est également un cas défavorable en termes de densité du fait de sa configuration historique, de formes urbaines laissant place à des rues plus étroites et non-orthogonales à l'inverse des villes comme Dubaï ou Chicago. Paris est donc une ville emblématique des villes européennes à travers ces facteurs.

En dernier point, Paris est un cas favorable à l'implantation d'un service de mobilité aérienne car sa population très élevée. Cette population est un atout pour ce service dans la mesure où elle assure un nombre d'usagers suffisamment important pour proposer une offre commerciale. En effet la population du milieu urbain à exploiter est un facteur décisif dans le choix d'implantation de ce nouveau mode de transport.

4. Résultats

Les résultats suivants sont exclusivement basés sur le cas d'étude de Paris, expliqué précédemment. Néanmoins, s'agissant d'un modèle, il est possible d'utiliser ces calculs pour d'autres cas d'études en modifiant les données en entrées.

4.1. Présentation des résultats

Une première partie des résultats concerne le temps de parcours des plus courts chemins sur le réseau routier parisien pour un VP (Figure 1: chemins empruntés par le VP).

2.1. Modèle d'analyse comparative

Pour réaliser ce modèle, j'ai utilisé le logiciel Toaster disponible sur MATLAB®. Dans un premier temps, l'utilisation de Toaster Network a permis de calculer un temps total de parcours des plus courts chemins du réseau routier (notre indicateur d'accessibilité), et ce pour un seul trajet entre chaque OD (Origine/Destination). Ainsi cette valeur sera notre valeur de référence à ne pas dépasser lorsque nous étudierons les variations de ce même temps de parcours sur le réseau du drone taxi.

L'utilisation de ce logiciel a également permis de réaliser un système logique permettant de faire varier des leviers pour mettre en évidence les variations d'une finalité en fonction d'un facteur bien précis. Ici, le levier est la topologie du réseau de transport parisien du drone taxi. En conservant les mêmes sommets dans les 2 réseaux, une comparaison, en faisant varier les arcs est aisée. C'est cette information qui va servir de levier pour la recherche de l'éventail des possibilités de topologies du réseau de notre drone taxi.

Pour faire le calcul de l'indicateur d'accessibilité de mon réseau, j'effectue une comparaison des plus courts chemins à l'aide de l'algorithme de Dijkstra. Cet algorithme va utiliser la distance calculée entre chaque point, dont les coordonnées (longitude, latitude) sont les variables d'entrées de notre système de calcul. Le calcul se fait en prenant compte du rayon de courbure de la terre (calcul peu utile pour des courtes distances, mais ce système de calcul étant un modèle, il convient de prendre en compte la possibilité de distance plus élevée).

$$D_{AB} = \text{acos} [\sin(\text{radians}(X_A)) * \sin(\text{radians}(X_B)) + \cos(\text{radians}(X_A)) * \cos(\text{radians}(X_B)) * \cos(\text{radians}(Y_A - Y_B))] * R$$

Avec X_A et X_B les altitudes des points A et B, Y_A et Y_B les longitudes des points A et B, et $R = 5371$ km (rayon de la Terre).

Une comparaison des valeurs de la distance/fréquentation de chaque arc est effectuée avec un seuil borné par le minimum et le maximum de la distance/fréquentation. Ce seuil servira de levier pour observer les variations de l'indicateur d'accessibilité du réseau.

Les origines et destinations choisies sont identiques et correspondent à l'ensemble des nœuds.

Enfin, la variable 'a' (voir Figure 3: Système logique tenant compte de la longueur) va créer une liste de couple de nœuds correspondant aux extrémités de chaque arc. Cette liste se veut volontairement complète (c'est-à-dire que tous les arcs existent entre tous les nœuds) car l'analyse se fera d'une situation parfaite (sans contrainte d'occupation du sol) avec un réseau complet, vers une situation dégradée où un ou plusieurs nœud(s) sera dans l'incapacité d'émettre ou recevoir des flux à cause d'un nombre d'arc (arrivant ou sortant de ce nœud) insuffisant.

De plus, pour faire varier notre réseau, une variable est utilisée pour ordonnancer l'évolution de nos arcs du réseau. Cette variable a été testée à 2 reprises. Une première fois en prenant en compte la longueur de chaque arc et une seconde fois en utilisant la fréquentation pour chacun des tronçons. Dans le premier cas, on a bien une réalité traduite par le fait que la longueur de chaque arc représente un coût. Faire varier son réseau en supprimant les arcs les plus longs en premier permettrait de diminuer ces coûts (coûts socio-économiques). Dans le second cas, la fréquentation de chaque arc utilisé comme levier (favorisant les arcs les plus fréquentés), représente bien une politique publique de transport, satisfaire l'intérêt général.

L'analyse va donc également comparer ces 2 leviers d'ordonnancement afin de mettre en avant lequel permet de conserver un temps de parcours des plus courts chemins le plus faible possible.

En utilisant Toaster Network, les premiers résultats montre un indicateur d'accessibilité des VP, sur le réseau routier de Paris, de 510,4 min, soit 8h30 min et 36sec (Table1).

Toujours avec le même outil, l'indicateur d'accessibilité, pour un réseau complet (Figure 2 : chemins empruntés par les drones taxisFigure 1:chemins empruntés par le VP) par les drones taxis est de 108,6 min, soit 1h48 min et 36 sec (Table2).

On peut donc en déduire que pour le temps de parcours, le drone taxi est 4 fois plus performant que le véhicule particulier. Cette grande différence est due à des vitesses pratiquées différentes qui influent de manière significative sur ce résultat. Cette différence est également due à 2 topologies de réseaux très opposées : la configuration du réseau pour le VP tient compte du réseau routier

parisien alors que la configuration du réseau pour le drone taxi s'affranchit des obstacles au sol de ce réseau. Il est donc constitué de ligne droite et relie toutes les origines à toutes les destinations de manière directe et sans correspondance, à l'image d'un réseau parfaitement complet.

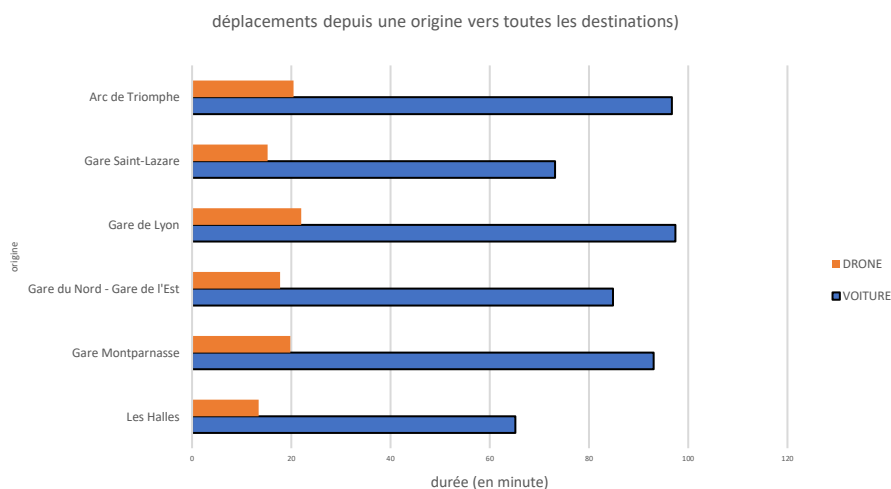
Table 1: Vitesse des plus courts chemins (par algorithme de Dijkstra) par le réseau routier parisien dans le cas d'un VP (en minute)

	Les Halles	Gare Montparnasse	Gare du Nord- Gare de l'Est	Gare de Lyon	Gare Saint-Lazare	Arc de Triomphe
Les Halles	0	14,1	10,7	12,6	10,3	17,4
Gare Montparnasse	14,1	0	22,9	20,2	17,8	17,9
Gare du Nord-Gare de l'Est	10,7	22,9	0	14,3	13,7	23,2
Gare de Lyon	12,6	20,2	14,3	0	21,7	28,5
Gare Saint-Lazare	10,3	17,8	13,7	21,7	0	9,6
Arc de Triomphe	17,4	17,9	23,2	28,5	9,6	0
Total: 510,4						

Table 2 : Vitesse des plus courts chemins (par algorithme de Dijkstra) en ligne droite dans le cas d'un drone taxi (en minute)

	Les Halles	Gare Montparnasse	Gare du Nord- Gare de l'Est	Gare de Lyon	Gare Saint-Lazare	Arc de Triomphe
Les Halles	0	3	2	3	1,9	3,5
Gare Montparnasse	3	0	5	3,9	3,9	4
Gare du Nord-Gare de l'Est	2	5	0	3,8	2,4	4,5
Gare de Lyon	3	3,9	3,8	0	4,9	6,4
Gare Saint-Lazare	1,9	3,9	2,4	4,9	0	2
Arc de Triomphe	3,5	4	4,5	6,4	2	0
Total: 108,6						

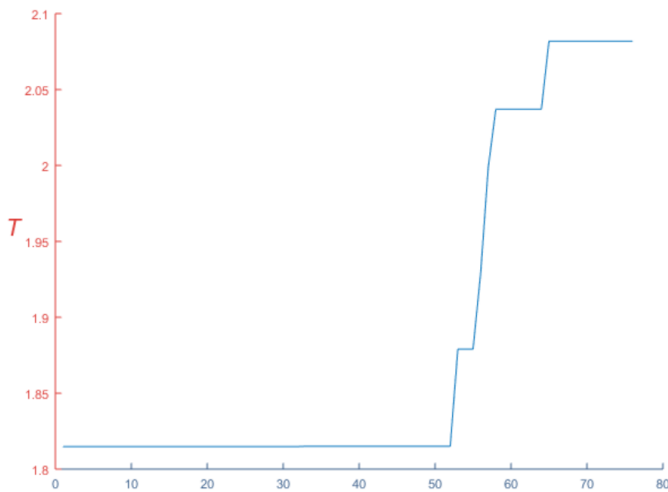
Table 3 : temps de parcours du drone et du VP



Une deuxième partie des résultats s'intéresse donc à démontrer l'influence du changement de réseau sur l'indicateur d'accessibilité, pour le drone taxi (réseau qui reste à définir puisqu'aucune législation en vigueur ne permet de l'encadrer).

Pour se faire, les simulations ont été réalisées sur l'outil Toaster Systems. La création du système logique a permis de faire varier les arcs du réseau pour obtenir l'évolution du temps de parcours en fonction du nombre d'arcs retirés du réseau (Figure 3: Système logique tenant compte de la longueur). Dans cette première suggestion de calcul, les arcs ont été retirés du plus long au moins long, jusqu'à obtenir des nœuds qui ne peuvent plus recevoir ou émettre de flux (graphe orienté). Pour se faire, les arcs vont être enlevés du réseau grâce à une simple comparaison : si la longueur de l'arc est supérieure à la longueur du seuil, alors l'arc est retiré. Un nouveau calcul des temps de parcours des plus courts chemins par l'algorithme de Dijkstra est effectué pour chaque itération de ce seuil, qui varie de la plus grande valeur de longueur d'arc à la plus petite. On obtient la courbe suivante.

Table 4: évolution du Durée de parcours du réseau en fonction de la longueur des arcs



Sur le graphique ci-dessus, on retrouve en abscisse le pourcentage des valeurs du seuil qui entre en jeux dans l'algorithme, pour supprimer les arcs de tailles identiques, dans le calcul du Dijkstra. On observe en ordonnée la somme des temps de parcours des plus courts chemins (parcourus 1 fois, en heure).

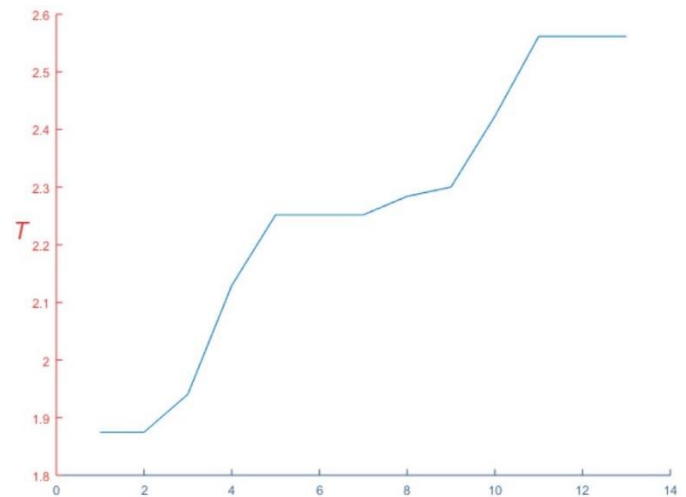
Pour enlever en premier les arcs les plus longs, les valeurs des arcs supérieurs au seuil sont remplacées par l'infini. Ainsi, le Dijkstra ne tient pas compte des arcs ayant des valeurs infinies. Le seuil est ensuite inversé de manière à afficher sur le graphique ci-dessus les inverses du pourcentage des valeurs admises. Ainsi les valeurs des arcs les plus longs sont supprimées en premier et le pourcentage de valeurs supprimées va du plus petit pourcentage de valeur supprimées au plus grand pourcentage, en faisant le cumul croissant à chaque itération.

On remarque ici qu'à partir de la 78^{ième} valeur, le réseau est déconnecté partiellement. Cela se traduit par un nœud qui ne peut plus émettre ou recevoir (voir les 2) des flux. Le réseau le plus proche d'un réseau de type arbre a donc un indicateur d'accessibilité de 2,0817h, soit 2h4min et 55 sec. Cette valeur est en dessous de l'indicateur d'accessibilité du VP qui est de 8h30 min et 36sec. La configuration du réseau à la 77^{ième} valeur est composée de 12 arcs restants.

Une autre simulation a été effectuée afin de la comparer à la simulation précédente (Figure 5 : système logique tenant compte de la fréquentation). En effet, cette nouvelle simulation utilise un seuil différent. Ce nouveau seuil qui incrémente la variation du réseau (suppression progressive des arcs selon un

ordonnancement donné) est caractérisé par la fréquentation de chaque arc. Pour se faire, on retire en priorité dans le réseau les arcs avec les fréquentations les plus faibles. On fait ensuite varier le seuil pour qu'il admette de plus en plus de valeurs de seuil ce qui va supprimer de plus en plus d'arcs du réseau. Le graphique ci-dessous représente l'évolution de l'indicateur d'accessibilité du drone (parcourus une seule fois), en fonction du seuil corrélé à la fréquentation.

Table 5 évolution du Durée de parcours en fonction de la fréquentation des arcs



Sur le graphique ci-dessus, l'ordonnée représente le pourcentage de valeur admise dans le seuil. Plus ce pourcentage est grand, plus il admet des valeurs élevées, et plus le réseau diminue en nombre d'arcs selon leurs fréquentations. On remarque qu'à partir de la 56^{ième} valeur du seuil, le réseau possède un nœud partiellement ou totalement déconnecté.

On observe également que la courbe n'est pas très détaillée. En effet, ceci est dû au fait que le réseau se détériore très rapidement. Un nœud est dans l'incapacité d'émettre ou de recevoir des flux à partir de 14% du seuil. Une résolution plus élevée (300 valeurs) permettrait de mieux voir les variations de cette courbe sur cet intervalle (Figure 7: évolution du Durée de parcours en fonction de la fréquentation des arcs avec une résolution plus élevée).

La 13^{ième} valeur du seuil représente donc le plus petit réseau possible avec 18 arcs restant sur les 30 arcs de départ. Le réseau a été détérioré de 12 arcs.

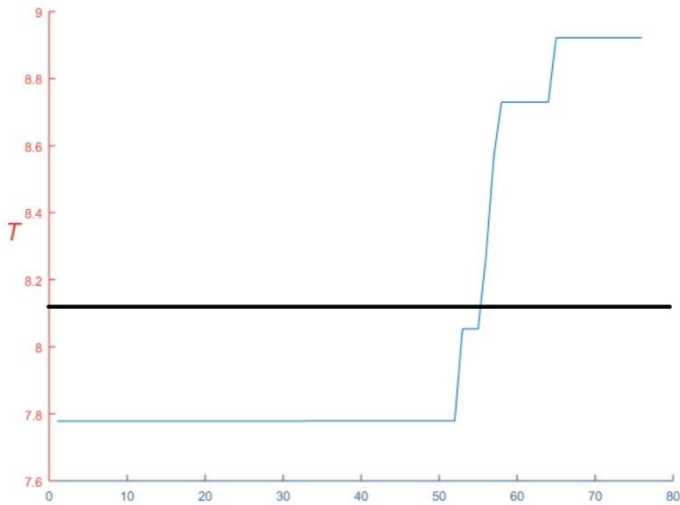
On observe toutefois que pour cette dernière valeur, l'indicateur d'accessibilité est de 2,5617h, soit 2h33 min et 42 sec, durée bien inférieure au 8h30 min et 36sec de durée pour la VP.

Dans les 2 cas, les valeurs maximales des sommes des temps de parcours des plus courts chemins restent inférieures à celle des VP. Le drone taxi est donc plus avantageux d'un point de vue de la durée de parcours. Les résultats montrent que le réseau se détériore à la même vitesse pour obtenir un nombre d'arcs retirés identique. Cependant, c'est pour le seuil corrélé à longueur des arcs que l'indicateur d'accessibilité est le meilleur, car inférieur à celui du seuil corrélé à la fréquentation.

4.2. Explication des différences entre les valeurs obtenues et attendues

Premièrement, le modèle nous permet d'obtenir des résultats très avantageux pour le drone taxi car ce modèle reflète une réalité bien particulière : le drone taxi a une vitesse plus élevée que le véhicule particulier. Ce facteur influence beaucoup les résultats et est, en grande partie, responsable des faibles valeurs observées sur notre indicateur d'accessibilité du drone taxi. Si nous prenions une vitesse identique pour les 2 modes de transport, nous obtiendrions un indicateur d'accessibilité supérieur à celui du véhicule particulier en raison de nombreuses correspondances à effectuer pour aller d'une origine vers une destination, comme on peut le voir dans les 2 graphiques suivant.

Table 6: évolution du Temps de parcours du réseau en fonction de la longueur des arcs avec une vitesse égale à 14,1 km/h



5. Conclusions

L'utilisation de 2 vitesses différentes pour la comparaison des réseaux routiers et aériens est en soit une limite à l'interprétation des résultats. En effet, pour effectuer une comparaison, il faut avoir des facteurs identiques dans les 2 éléments à comparer afin de conclure de manière plus sûre de l'importance d'un facteur en particulier dans l'obtention de résultats très différents. Néanmoins cette utilisation de 2 vitesses reflète une réalité sûre et qui ne variera pas dans le temps. En effet, le drone taxi n'est qu'au début son développement et va voir sa vitesse augmenter dans le futur. A l'inverse, le véhicule particulier arrive à ses limites en termes d'augmentation de la vitesse en milieu urbain. Il est vrai, le VP ne peut s'affranchir désormais d'un certain nombre de contraintes liées à la sécurité et aux bâtis.

Également, la mise en avant de la méthode de variation du réseau en fonction de la fréquentation ne reflète que partiellement l'intérêt général que doit avoir une politique publique. En fonction des définitions que l'on lui donne, l'intérêt général représente un bien commun, qui vise à maximiser les bonheurs personnels de tous les usagers d'une même zone urbaine ; ou alors comme un intérêt commun qui représente plus une conciliation des intérêts de chacun.

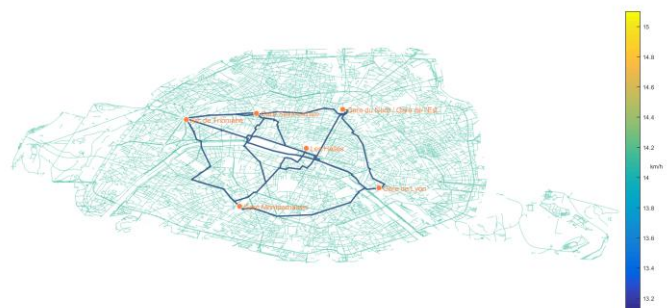
Pour lever ces critiques, une analyse pourrait être faite en regroupant un ensemble de plusieurs facteurs comme la distance, la fréquentation, les nuisances sonores ou encore le respect de la vie privée (distances par rapport au bâti) sur des données issues de prédictions à l'horizon 2030. Ces facteurs sont déjà étudiés dans les analyses socio-économiques des grands projets d'infrastructures. Regrouper tous ces facteurs sous un même seuil et les affecter à chacun des arcs du réseau, pourrait refléter au mieux l'impact de l'occupation du sol sur le réseau de transport aérien, en milieu urbain, et ainsi proposer une multitude de configurations de réseaux aériens, sans rendre le nouveau mode de transport moins avantageux, en termes d'accessibilité, que le mode de transport VP.

Références

- Cyprien Richer, P. P., 2011. *Mesurer l'accessibilité en transport collectif aux pôles d'excellence de Lille Métropole*, Grenoble: HAL.
- Decourt, R., 27/05/2018. *futura sciences*. [En ligne] Available at: <https://www.futura-sciences.com/tech/actualites/drone-taxis-volants-nasa-uber-planchent-regulation-traffic-64520/>
- Hassani, J. E., 26/04/18. *journal du net*. [En ligne] Available at: <https://www.journaldunet.com/economie/transport/1209068-drones-taxis-volants-ciel-europeen-reforme/>

Annexe

Figure 1: chemins empruntés par le VP



Pour le cas de la distance comme seuil, la valeur de l'indicateur d'accessibilité des drones taxis atteint celle des VP à 56% du seuil ce qui correspond à un réseau réduit à 18 arcs.

Dans le cas de la fréquentation comme seuil, on remarque que l'on atteint très rapidement la valeur de l'indicateur d'accessibilité du VP (ici à 9% du seuil, avec une résolution de 300) laissant une faible amplitude de modification du réseau, par le seuil de la fréquentation (de 1 à 3% des valeurs du seuil), ce qui correspond à un réseau réduit à 27 arcs.

Ainsi même avec une vitesse égale, il est possible de réduire le réseau du drone taxi en supprimant des arcs sans pour autant avoir un indicateur d'accessibilité inférieur à celui du véhicule particulier. Néanmoins, il est important de remarquer que dans ce cas précis, la possibilité de dégradation du réseau est bien plus importante pour le calcul avec le seuil en longueur, que pour le calcul avec le seuil en fréquentation. Le calcul par seuil de longueur d'arc est donc plus performant pour obtenir un réseau proche du type arbre.

Figure 2 : chemins empruntés par les drones taxis

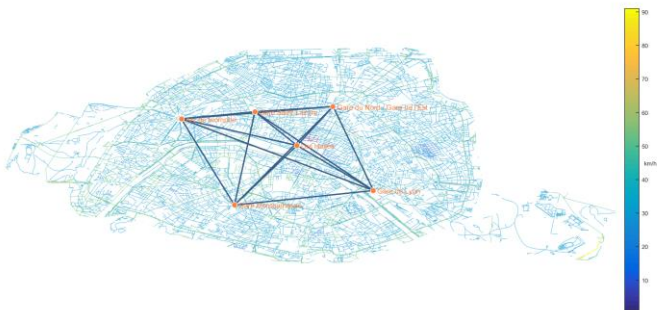


Figure 3: Système logique tenant compte de la longueur

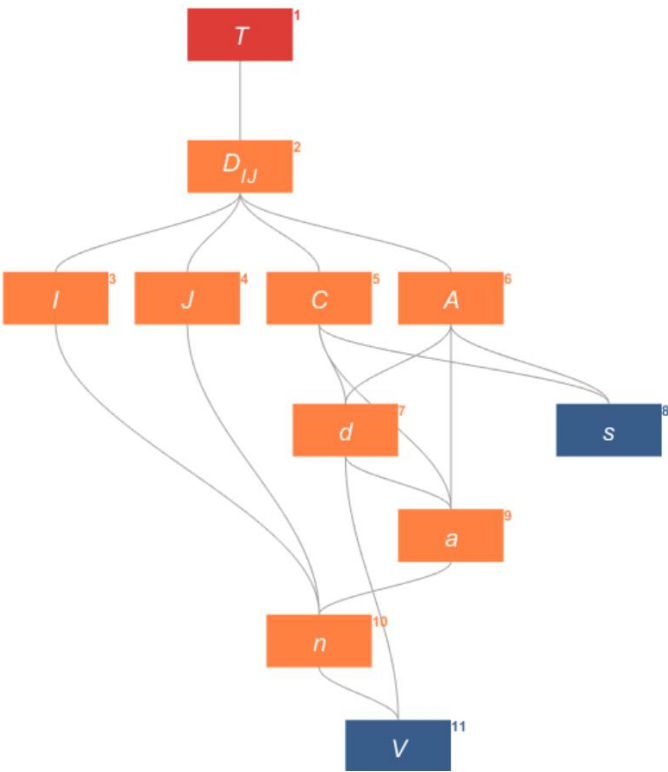
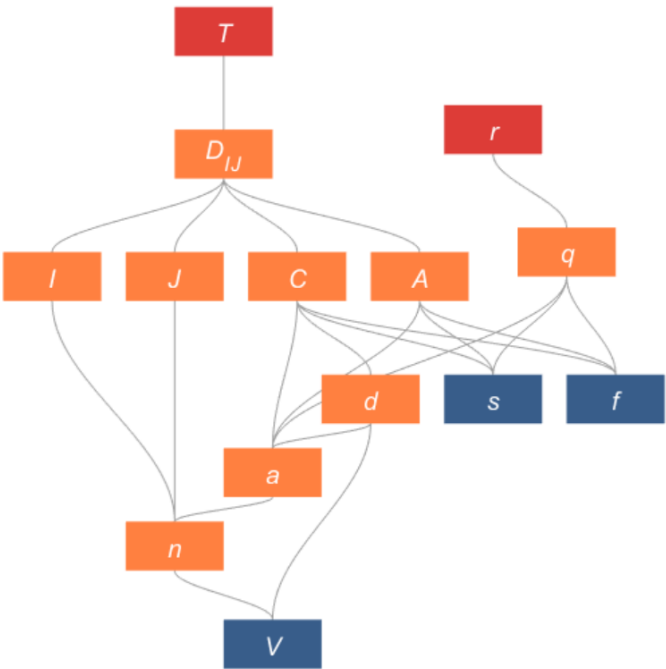


Figure 4 : légende du système logique utilisant la distance

- 1. Temps total de parcours des plus courts chemins
Exprimé en h
 $T = f(D_{IJ})$
- 2. Distance des plus courts chemins
Exprimé en km
 $D_{IJ} = \text{dijkstra}(A, C, I, J)$
- 3. Ensemble des origines
 $I = 1 : n$
- 4. Ensemble des destinations
 $J = 1 : n$
- 5. Matrice des couts en fonction de la distance
 $C = [a, d, s]$
- 6. Nouveaux arcs
 $A = a (d > s)$
- 7. Distance sur chaque arc
 $d = \text{distance}(V, a)$
Exprimé en km
- 8. Seuil
 $1.9398 \leq s \leq 6.3824$
Exprimé en km
- 9. Arc de mon réseau complet
 $a = n$
- 10. Nombre de nœuds
 $n = \text{card}(V)$
- 11. Coord des sommets

Figure 5 : système logique tenant compte de la fréquentation



Système logique avec finalité donnant le nombre d 'arc restant du nouveau réseau.

Figure 6 : légende du système logique utilisant la fréquentation

- 1. Indicateur d'accessibilité du réseau $T = f(D_{IJ})$	Exprimé en km
Exprimé en h	
- 2. Nombre d'arcs restant sur le réseau $r(q)$	- 8. Nouveaux arcs $A = a(f < s)$
Exprimé Sans unité	Exprimé Sans unité
- 3. Distance des plus courts chemins $D_{IJ} = \text{dijkstra}(A, C, I, J)$	- 9. Distance sur chaque arc $d = \text{distance_degredecimal}(V, a);$
Exprimé en km	Exprimé en km
- 4. Matrice des arcs restant $q(a, s, f)$	- 10. Seuil
Exprimé Sans unité	- 11. Fréquentation journalière Exprimé en pers
- 5. Ensemble des origines $I = 1 : n;$	- 12. Arc de mon réseau complet $a = \text{adjacence}(n)$
Exprimé Sans unité	Exprimé Sans unité
- 6. Ensemble des mes destinations $J = 1 : n;$	- 13. Nombre de nœuds $n = \text{card}(V)$
Exprimé Sans unité	Exprimé Sans unité
- 7. Matrice des couts en fonction de la distance $C = [a, d, s, f]$	- 14. Coordonnées des sommets $2.2958 \leq V \leq 48.8783$

Figure 8 : code du système logique calculant l'indicateur d'accessibilité en fonction de la longueur des arcs

```

% input (variables exogènes) :
% V : coord des sommets en Aucune
% s : seuil en Aucune
%
% output (finalités)
% T : temps total de parcours des plus courts chemins en h
% r : nombre d'arc restant en Aucune
% n : nombre de noeuds en Aucune
% a : arc de mon réseau complet en Aucune
% d : distance sur chaque arc en km
% A : nouveaux arcs en Aucune
% I : ensemble des origines en Aucune
% J : ensemble des mes destinations en Aucune
% C : matrice des couts en fonction de la distance en km
% D_I_J : distance des plus courts chemins en km
% q : qqq en Aucune
%
% Exemple :
% V = 2.2958 + 46.5825*rand([6 2]);
% s = 1.9398 + 4.4426*rand([1 1]);
% [ T , r ] = gtjeirzpfongr( V , s ) ;
%
% Généré automatiquement par toaster systems - Copyright : Mindjid Maïzia - PolyTech Tours 2018
% L'auteur n'est nullement responsable des éventuelles erreurs de fonctionnement de
% l'application
% Tout usage des produits toaster doit être signalé par la référence :
% Mindjid Maïzia, toaster integral, tools for model computing, PolyTech Tours, 2016-2022

V = input.V ;
s = input.s ;
n = F126986816 ( V ) ;
a = F814723686 ( n ) ;
d = F590991455 ( a , V ) ;
A = F482230405 ( a , d , s ) ;
I = F567779031 ( n ) ;
J = F316320497 ( n ) ;
C = F91606263 ( a , d , s ) ;
D_I_J = F3555447 ( A , I , J , C ) ;
q = F377705712 ( a , d , s ) ;
T = F379941220 ( D_I_J ) ;
r = F188444196 ( q ) ;
output.n = n;
output.a = a;
output.d = d;
output.A = A;
output.I = I;
output.J = J;
output.C = C;
output.D_I_J = D_I_J;
output.q = q;
output.T = T;
output.r = r;

function n = F126986816 ( V )
% nombre de noeuds
n = size(V,1);
end

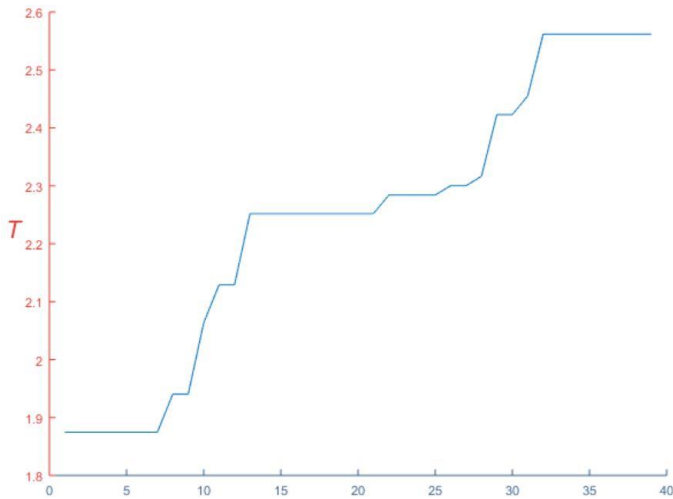
function a = F814723686 ( n )
% arc de mon réseau complet
[i,j]=meshgrid(1:n,1:n);
a=[i(:) , j(:)];
a(i(:) == j(:),:)=[];
end

function d = F590991455 ( a , V )
% distance sur chaque arc
i=a(:,1);
j=a(:,2);
V=V*pi/180;
d = sin(V(i,1)).*sin(V(j,1))+cos(V(i,1)).*cos(V(j,1)).*cos(V(i,2)-V(j,2));
d = acos(d)*6371;
end

function A = F482230405 ( a , d , s )
% nouveaux arcs

```

Figure 7: évolution du Durée de parcours en fonction de la fréquentation des arcs avec une résolution plus élevée




```

    A=a;
    A(d>s,3)=inf;
end

function I = F567779031 ( n )
% ensemble des origines
    I=1:n;
end

function J = F316320497 ( n )
% ensemble des mes destinations
    J=1:n;
end

function C = F91606263 ( a , d , s )
% matrice des couts en fonction de la distance
    C=[a,d];
    C(d>s,3)=inf;
end

function D_I_J = F3555447 ( A , I , J , C )
% distance des plus courts chemins
    D_I_J=inf;
    if ~isempty(A)
        D_I_J= dijkstra(A,C,I,J);
    end
end

function q = F377705712 ( a , d , s )
% qq
    q=a;
    q(d>s,:)=[];
end

function T = F379941220 ( D_I_J )
% temps total de parcours des plus courts chemins
    T=sum(D_I_J(:))/60;
end

function T = F379941220 ( D_I_J )
% temps total de parcours des plus courts chemins
    T=sum(D_I_J(:))/60;
end

function r = F188444196 ( q )
% nombre d'arc restant
    r=size(q,1);
end

end
% Copyright : Mindjid MAIZIA 2016-2022 , PolyTech Tours

```